

石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 2011. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究 [J]. 大气科学, 35 (4): 707–720. Shi Shengwei, Li Yu'e, Li Mingde, et al. 2011. Annual CH_4 and N_2O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 707–720.

不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究

石生伟^{1,2} 李玉娥¹ 李明德³ 万运帆¹ 高清竹¹ 彭华³ 秦晓波¹

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

3 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125

摘要 选取湖南典型红壤双季稻田为研究对象, 采用静态箱—气相色谱法对不施肥对照 (CK)、常规施化肥 (NPK)、新鲜稻草与化肥配施 (RS+NPK1)、菌渣与化肥配施 (MR+NPK1)、新鲜牛粪与化肥配施 (CD+NPK2) 和沼渣与化肥配施 (BD+NPK2) 等 6 个处理的 CH_4 和 N_2O 排放通量进行为期一年的观测 (早稻、晚稻和休闲期), 研究排放特征与驱动因素。结果表明, 不同处理的 CH_4 排放均表现出“早稻生长期少, 晚稻生长期多, 休闲期弱”的特点, 而 N_2O 排放主要发生在水稻生长期内 (78% 以上), 休闲期内排放较少。NPK 的 CH_4 排放比 CK 增加了 35%, 差异不显著 ($P > 0.05$, P 是拒绝原假设的犯错概率)。有机无机配施处理中, RS+NPK1 和 CD+NPK2 的 CH_4 全年累计排放量分别是 MR+NPK1 和 BD+NPK2 的 2.44 和 2.45 倍 ($P < 0.05$), 但后者的 N_2O 全年累计排放量分别比前者提高了 59% 和 102% ($P > 0.05$)。与单施化肥相比, 有机无机配施使稻田氮肥 N_2O —N 直接排放系数降低 45%~80%。相关环境因素分析表明, 水、热变化是驱动稻田 CH_4 排放季节变化的主要因素。本研究未发现水分变化与 N_2O 排放通量之间存在直接联系, 而且 CH_4 和 N_2O 在排放时间上不存在消长关系。 CH_4 和 N_2O 的整体温室效应表明, CH_4 是当地双季稻田的主要温室气体。采用腐熟后的菌渣和沼渣代替新鲜的稻草和牛粪还田可以使稻田 CH_4 排放量降低约 60%, CH_4 和 N_2O 的整体温室效应降低约 50%, 而稻谷产量保持不变。

关键词 稻田 CH_4 N_2O 施肥

文章编号 1006-9895 (2011) 04-0707-14

中图分类号 P464

文献标识码 A

Annual CH_4 and N_2O Emissions from Double Rice Cropping Systems under Various Fertilizer Regimes in Hunan Province, China

SHI Shengwei^{1, 2}, LI Yu'e¹, LI Mingde³, WAN Yunfan¹, GAO Qingzhu¹,
PENG Hua³, and QIN Xiaobo¹

1 Institute of Agro-Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Sciences/The Key Laboratory for Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125

收稿日期 2010-07-30, 2011-02-18 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2008BAD95B13、2008BAD95B02, 国家 973 计划项目 2010CB951302, “十一五”支撑计划项目 2007BAD89B11

作者简介 石生伟, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事农田固碳减排及全球变化生物学方向研究。E-mail: weiweishi848@gmail.com

通讯作者 李玉娥, E-mail: yueli@ami.ac.cn

Abstract Annual CH_4 and N_2O emission fluxes were measured from double rice cropping systems under six fertilization treatments by using the method of static chamber-gas chromatograph techniques. The different treatments including non-fertilizer (CK), conventional chemical fertilizers (NPK), fresh rice straw with chemical fertilizers (RS+NPK1), mushroom residue with chemical fertilizers (MR+NPK1), fresh cow dung with chemical fertilizers (CD+NPK2), and biogas digestion with chemical fertilizers (BD+NPK2) were dedicated to this experiment in order to study the characteristics of CH_4 and N_2O emissions and the relationship between gas emission fluxes and related environmental factors. The results showed that, seasonal variation of CH_4 emission fluxes under different treatments displayed the same trend, which can be described as “lower in early rice growing period, higher in late rice growing stage, and negligible in the fallow season”. The majority of N_2O emissions (more than 78%) occurred in rice growing periods, and small amounts of N_2O emission occurred in the fallow season. Although the annual accumulated CH_4 emission amount for NPK was increased by 35% compared with CK, the difference between them was not significant at 0.05 level. Among different treatments of organic and mineral fertilizers, the annual accumulated CH_4 emission amount for RS+NPK1 was 2.44 times more than that for MR+NPK1 ($P < 0.05$, P is the significance level), while the annual N_2O emission amount for the latter was 59% higher than that for the former ($P > 0.05$). The annual accumulated CH_4 emission amount for CD+NPK2 was 2.45 times more than that for BD+NPK2 ($P < 0.05$), but the annual N_2O emission amount for the latter increased by 102% compared with CD+NPK2 ($P > 0.05$). The fertilizer-induced direct N_2O emission factor (E) was reduced by 45%–80% under the treatments of combined application of chemical and organic fertilizers in paddy fields compared to NPK. In this analysis, water status and temperature were main driving factors which affected the seasonal variation of CH_4 emission fluxes. However, N_2O emission fluxes did not have direct relation with water status in double rice paddies and a temporal trade-off relationship between the two gas emission fluxes was not observed in this study. CH_4 was the dominant greenhouse gas which contributed more than 75% to the integrated global warming potential of CH_4 and N_2O emissions in local double rice fields. By using composted mushroom residue and biogas digestion to substitute for fresh rice straw and cow dung for returning fields, CH_4 emission and integrated global warming potential of CH_4 and N_2O emissions reduced by approximately 60% and 50%, respectively, and the grain yield will not be affected.

Key words rice field, CH_4 , N_2O , fertilization

1 引言

气候变化很可能与大气中人为活动排放的温室气体浓度上升密切相关 (IPCC, 2007)。 CH_4 和 N_2O 是仅次于 CO_2 的重要温室气体, 对全球增温的贡献率分别达到 14.3% 和 7.9% (IPCC, 2007)。我国是水稻生产大国, 来源于稻田排放的 CH_4 和 N_2O 倍受研究关注。施肥措施和水分管理方式对稻田 CH_4 和 N_2O 排放具有重要的影响 (王明星等, 1998; Zou et al., 2005; 石生伟等, 2010)。在施肥方面, 过量施用氮肥和有机无机配施是目前我国稻田施肥的主要特征 (廖西元等, 2007; 张福锁等, 2008)。在水分管理方面, 我国大多数稻作区由传统的持续淹水转变为前期淹水、中期排水晒田与后期根据天气情况灵活选择灌溉次数的方式 (Zou et al., 2009)。水分管理方式的改变在有效降低稻田 CH_4 排放的同时, 会极大增加 N_2O 排放 (Zheng et

al., 2000; Zou et al., 2007)。但也有一些研究认为, 排水晒田不会增加稻田 N_2O 排放 (Yagi et al., 1996)。

有机无机配施无疑会促进稻田 CH_4 排放, 但不同形式的有机肥产生 CH_4 的能力存在很大差异, 这意味着优化施肥措施在减少稻田 CH_4 排放方面潜力巨大。施用有机肥对农田 N_2O 排放的影响尚不能确定。一方面, 有机肥中的氮是产生 N_2O 的重要来源之一。在估算农田 N_2O 排放时, 通常将有机肥列入估算农田 N_2O 排放清单中的一部分 (IPCC, 2006)。另一方面, 施用有机肥增加土壤有机碳含量, 有机碳能够固定土壤速效氮并促进 N_2O 转化为 N_2 的反硝化过程从而减少 N_2O 排放 (Azam et al., 2002), 如高 C/N 比秸秆还田降低稻田 N_2O 排放 (邹建文等, 2003; Yao et al., 2010)。

以往对稻田温室气体排放的观测, 主要集中在水稻生长季内 (Cai et al., 1997; 袁伟玲等, 2008),

而包含休闲期或非水稻生长季的完整观测料仅有少数研究报道 (Zheng et al., 2000; Nishimura et al., 2004)。周年的观测数据是准确估算稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量的重要依据 (Bouwman, 1996; IPCC, 2006)。双季稻在我国具有广泛种植面积 (Xing et al., 2009), 而目前关于双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放周年的观测资料较为缺乏 (观测年份 ≥ 1 年)。其次, 以往的研究表明, 稻田在非水稻期内存在一定的 CH₄ 排放 (马秀梅等, 2005; 江长胜等, 2006), 而 N₂O 排放主要集中在稻田的非淹水期内 (Nishimura et al., 2004)。双季稻田的休闲期比较长, 休闲期内降水与温度变化很大, 以往的研究结论能否外推至双季稻作区还有待验证。

本文以湖南典型红壤双季稻田为研究对象, 选取常规施化肥和有机无机配施等处理, 进行为期一年的观测 (早稻、晚稻和休闲期), 研究 CH₄ 和 N₂O 排放特征与驱动因素, 比较不同处理对双季稻田生产效益和环境效益的影响, 为识别和评价有效的减排措施提供试验依据。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡平安村 (28°08'19"N, 113°12'16"E), 属于亚热带季风湿润

气候区, 海拔 42 m, 年平均温度为 17.1 °C, 多年年均降水量 1316 mm, 降水多集中在 3~6 月, 年 ≥ 10 °C 积温 5300~6500 °C。当地种植模式多为双季稻—冬闲和双季稻—油菜, 土壤类型属于第四纪红色粘土发育的红黄泥水稻土, 基本理化性质为有机质 1.85%, 碱解氮 124 mg/kg, 有效磷 13.4 mg/kg, 速效钾 47 mg/kg, pH 5.20 (H₂O)。

2.2 试验设计及田间管理

试验采用单因素区组设计, 包括不施肥对照 (CK)、单施化肥处理 (NPK) 和 4 种有机物料与化肥配施等 6 个处理, 设置 3 个重复。各小区长 5 m, 宽 4 m, 小区田埂采用薄膜覆盖以避免相互串水。4 种有机物料分别是: 新鲜稻草 (RS, 简称稻草)、稻草栽培食用菌后的菌渣 (MR, 简称菌渣)、稻草过腹后的新鲜牛粪 (CD, 简称牛粪) 和猪粪与水稻秸秆粉末发酵后的沼渣 (BD, 简称沼渣), 基本理化性质见表 1。

由于不同有机物料在理化性质和养分释放方面存在差异, 有机无机配施以总氮投入量为主要控制因素, 将稻草和菌渣作为比较对象, 配施等量化肥 (NPK1); 将牛粪和沼渣作为比较对象, 配施等量化肥 (NPK2)。其中 NPK1 和 NPK2 的化学氮、磷和钾肥用量分别为单施化肥处理 (NPK) 用量的 90% 和 80%。不同处理的具体施肥量见表 2。

表 1 不同有机肥物料的基本性质

Table 1 Basic properties of different organic amendments

处理	早稻						晚稻					
	水分	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机碳	C/N	水分	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机碳	C/N
RS	7.37%	0.75%	0.09%	1.75%	40.61%	54.15	23.20%	0.92%	0.10%	2.65%	43.56%	47.34
MR	69.20%	2.12%	1.67%	3.07%	34.22%	16.14	69.60%	2.18%	2.24%	2.82%	30.97%	14.21
CD	75.10%	1.76%	2.08%	0.79%	37.18%	21.12	77.30%	1.52%	1.61%	1.57%	41.24%	27.20
BD	65.20%	1.23%	2.42%	0.25%	36.94%	30.04	63.30%	1.08%	2.49%	0.73%	35.61%	32.97

注: 有机碳和养分含量按干基质量计。

表 2 不同处理的施肥量

Table 2 Fertilizer application rates of different treatments

处理	早稻				晚稻			
	氮肥 N/ kg · hm ⁻¹	磷肥 P ₂ O ₅ / kg · hm ⁻²	钾肥 K ₂ O/ kg · hm ⁻²	有机肥/ t · hm ⁻²	氮肥 N/ kg · hm ⁻²	磷肥 P ₂ O ₅ / kg · hm ⁻²	钾肥 K ₂ O/ kg · hm ⁻²	有机肥/ t · hm ⁻²
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
NPK	165	75	105	0	180	45	150	0
RS+NPK1	148.5	67	94	6.25	162	40	135	6.25
MR+NPK1	148.5	67	94	7.5	162	40	135	7.5
CD+NPK2	132	60	84	22.5	144	36	120	22.5
BD+NPK2	132	60	84	22.5	144	36	120	22.5

化学氮、磷和钾肥分别为尿素(含 N 量 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 含量 14%) 和氯化钾(K_2O 含量 60%)。磷肥以基肥形式一次性施入,而氮肥和钾肥则在不同水稻生长时期追施。稻草还田时切成 20 cm 左右长,所有有机物料均翻埋入土中。在实际操作中由于不同有机物料的含氮量、水分等因素具有很大的不确定性,实际投入的养分根据实测数据计算。早、晚稻的品种分别为杂交稻嘉育早 17 号和优质稻岳优 360,观测时间为 2009 年 4 月 27 日至 2010 年 4 月 28 日,具体田间管理管理见表 3。

表 3 双季稻主要的田间管理措施

Table 3 Management measures of double rice fields

	时间	管理措施
早稻	2009 年 3 月 24 日	播种育苗
	2009 年 4 月 26 日	施入基肥(50%氮肥,100%磷肥和 60%的钾肥),有机物料填埋
	2009 年 4 月 27 日	移栽,插秧密度 20 cm×20 cm
	2009 年 5 月 8 日	追分蘖肥(40%氮肥和 40%钾肥)
	2009 年 6 月 8~17 日	排水晒田
	2009 年 6 月 18 日	追穗肥(10%氮肥)
	2009 年 7 月 13 日	收割
	2009 年 7 月 14 日	翻耕
晚稻	2009 年 6 月 8 日	播种育苗
	2009 年 7 月 14 日	翻耕
	2009 年 7 月 15 日	施入基肥(50%氮肥,100%磷肥和 50%的钾肥),有机物料填埋,移栽
	2009 年 7 月 23 日	追分蘖肥(40%氮肥和 50%钾肥)
	2009 年 8 月 13~20 日	排水晒田
	2009 年 9 月 07 日	追穗肥(10%氮肥)
休闲期	2009 年 10 月 10 日	收割
	2009 年 10 月 11 日~ 2010 年 4 月 28 日	休闲期取样

2.3 采样方法及测定指标

采用静态暗箱—气相色谱法,以手动采样的方式进行观测。采样箱采用聚碳酸酯材料制成,直径 55 cm,高 1.2 m。箱体外表粘贴“黑色+纯白色”双层波音片材料,分别用来隔绝光线和避免箱体吸收太阳光辐射而引起箱内温度升高。采样箱内装有通过蓄电池驱动的风扇用来搅匀气体。底座由不锈钢材料制成,底面积 0.25 m²,水稻移栽前插入土壤 10 cm,底座下有一根“U”型硬塑料管使圈内圈外连通,保证底座内的水分状态与大田实际状态一

致。采样时间为上午 08:00~10:00(北京时间),每次采样前在底座水槽内加水保证密闭,在罩箱 5、10、15 和 20 min 后用注射器抽取 60 ml 气体,注入预先抽真空的玻璃瓶中保存并带回实验室测定其浓度。早、晚稻生长期内的采样频率为每隔 3 天一次,遇强降雨天气则提前或推迟一天取样,并在晒田期内加密取样频率。采气过程中同步测定每个小区的水层深度、土壤 5 cm 温度、酸碱度(pH)和氧化还原电位(Eh)。采样时的气温数据由试验田附近的自动气象站自动记录。休闲期的取样频率为每周一次。休闲期仅测定土壤 5 cm 温度、湿度和气象数据。

气体 CH₄ 和 N₂O 浓度采用气相色谱(Agilent7890A,美国)测定,检测器分别是火焰离子化检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),温度分别为 200℃和 330℃,分离材料是 PQ 填充柱,柱温 55℃,以高纯氮气为载气。测定 N₂O 浓度的 ECD 采用 CO₂(5.6%)—N₂ 混合气体进行尾吹以保证信号稳定(Zheng et al., 2008)。仪器的校准采用由国家标准物质中心提供的 CH₄ 和 N₂O 标准气体。

水稻生长期土壤 pH 和 Eh 分别由便携式酸度计(IQ Scientific Instruments150,美国)和氧化还原测定仪(Ecoscan,意大利)测定,土壤 0~10 cm 内的体积含水量通过水分自动测定仪(ECH₂O Logger,美国)记录。

2.4 计算方法和数据分析

稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量计算公式如下(Zheng et al., 2000):

$$F = \rho h \frac{dC}{dt} \frac{273}{273+t} \frac{p}{p_0}, \quad (1)$$

其中, F 为 CH₄ 的排放通量(单位: mg·m⁻²·h⁻¹) 和 N₂O 的排放通量(单位: μg·m⁻²·h⁻¹), ρ 为二者在标准状态下的密度(CH₄ 为 0.714 kg/m³ 和 N₂O 为 1.964 kg/m³), h 是经过水层高度调整后采样箱顶部距水面的实际高度(单位: m), dC/dt 为采样过程中采样箱内 CH₄ 浓度变化率(单位: ml·m⁻³·h⁻¹) 或 N₂O 浓度变化率(单位: μl·m⁻³·h⁻¹), t 为采样箱内的平均温度(单位: °C), p 为采样箱内气压, p_0 为标准大气压。由于该地区海拔为 42 m, 气压影响很小, 实际计算中忽略气压的影响。

CH₄ 和 N₂O-N 季节累积排放量(单位: kg/

hm²) 是由相邻两次气体排放通量的平均值与观测间隔时间相乘, 然后逐次累加而得, 分别以 CH₄ 和 N 计。

土壤湿度 (Water-filled pore space, θ_w) 计算方式 (Farquharson and Baldock, 2008) 为:

$$\theta_w = \frac{\theta_v}{T_p} = \frac{\theta_v}{\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_s}\right)}, \quad (2)$$

其中, θ_v 是土壤体积含水量 (cm³/cm³), T_p 是土壤总孔隙度 (cm³/cm³), ρ_v 是土壤容重 (g/cm³), ρ_s 为土壤密度 (2.65 g/cm³)。

双季稻田氮肥的 N₂O-N 直接排放系数 (Emission factor, E) 计算公式 (Zheng et al., 2004) 为:

$$E = \frac{N_t - N_0}{N_F}, \quad (3)$$

其中, N_t 为施氮肥处理 N₂O-N 排放量 (单位: kg/hm²), N_0 为不施肥处理 N₂O-N 排放量 (单位: kg/hm²), N_F 为总氮的投入量 (单位: kg/hm²)。 N_t 、 N_0 和 N_F 均以 N 计。

为比较不同有机物料产生 CH₄ 的能力, 参照公式 (3), 采用有机碳投入量转化 CH₄-C 的系数 (Q) 作为衡量不同有机物料产 CH₄ 能力的指标, 即有机无机配施处理的 CH₄ 排放量减去 NPK 的 CH₄ 排放量与总有机碳投入量的比值。

$$Q = \frac{C_t - C_0}{C_F}, \quad (4)$$

其中, C_t 为有机无机配施处理 CH₄-C 排放量 (单位: kg/hm²), C_0 为单施化肥处理 CH₄-C 排放量 (单位: kg/hm²), C_F 为总有机碳投入量 (单位: kg/hm²)。 C_t 、 C_0 和 C_F 均以 C 计。

试验数据经 Excel 整理后采用 OriginPro8 软件作图并用 SAS8.1 软件进行统计分析, 不同指标的显著性检验均采用 LSD 法检验。稻田气体排放通量 F 与气温 (T_a)、土壤 5 cm 温度 (T_s)、水层厚度、pH、Eh 以及 0 ~ 10 cm 土壤湿度 θ_w 等环境因素采用多元线性回归 (Stepwise selection model) 分析。

3 结果与分析

3.1 CH₄ 排放通量的季节变化和累计排放量

不同施肥处理早、晚稻 CH₄ 排放通量表现出相似的季节变化规律 (图 1)。早稻 CH₄ 排放通量变

化比较平缓, 排放强度低, 持续时间长, 变化范围在 0~30 mg·m⁻²·h⁻¹; 晚稻 CH₄ 排放通量变化迅速, 排放强度大, 变化范围在 0~70 mg·m⁻²·h⁻¹。不同处理在晚稻生长期均表现为晒田前集中排放, 晒田后急剧降低, 即使后期淹水条件下 CH₄ 排放也极其有限。休闲期内 CH₄ 排放维持很低水平, 并观测到微量吸收。对照、施化肥处理、稻草处理、菌渣处理、牛粪处理和沼渣处理的休闲期平均 CH₄ 排放通量为 0.01、0.09、0.05、0.18、0.17 和 0.04 mg·m⁻²·h⁻¹, 远低于水稻生长期排放通量 (表 4)。

稻田 CH₄ 排放主要集中在水稻生长期 (95% 以上)。对照、施化肥处理、稻草处理、菌渣处理、牛粪处理和沼渣处理的早稻 CH₄ 累计排放量分别占全年排放量的 44%、27%、33%、44%、23% 和 27%, 晚稻累计排放量分别占全年排放量的 55%、72%、67%、52%、75% 和 72%。休闲期内 CH₄ 排放较少, 菌渣和牛粪处理的 CH₄ 排放量仅占全年排放量的 4.40% 和 1.16%, 其他处理均小于 1%。就全年排放而言, 施化肥处理比不施肥处理增加了 35% 的 CH₄ 排放, 但差异不显著 ($P>0.05$)。有机无机配施处理中, 稻草处理的 CH₄ 排放量是菌渣处理的 2.44 倍, 牛粪处理的 CH₄ 排放量是沼渣处理的 2.45 倍, 差异均显著 ($P<0.05$)。

3.2 N₂O 排放通量的季节变化和累积排放量

早、晚稻生长期施化肥处理和有机无机配施处理分别出现一次主要的 N₂O 排放峰 (图 2)。早稻移栽 11 天后, 由于水层落干出现明显的排放, 第 19 天达到整个生育期内的排放最大值, 以施化肥处理最高, 菌渣处理次之。此后, 由于灌溉迅速下降至零排放, 晒田期内无 N₂O 排放峰, 而收割前的无水期内牛粪处理出现一个较小的排放峰, 其他处理排放不明显。晚稻 N₂O 排放峰普遍低于早稻, 晒田期也未发现 N₂O 排放峰。晚稻 N₂O 排放主要出现在移栽后的淹水阶段, 沼渣处理排放峰值最大。其他阶段的排放较为微弱, 幅度在 0~200 μg·m⁻²·h⁻¹。休闲期内 N₂O 排放很微弱, 但连续降水后出现较为明显的排放 (2009 年 11 月 17 日), 此后温度较低, 降水较少, 无持续的 N₂O 排放出现。2010 年 4 月 2 日出现休闲期的第二个 N₂O 排放峰, 可能由于该时期降水较多, 气温逐步回升, 微生物硝化和反硝化活动加剧引起的。2010 年 4

表 4 不同施肥处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量Table 4 CH₄ and N₂O emissions in double rice fields under different fertilization treatments

稻季	处理	CH ₄ 排放		N ₂ O 排放	
		平均排放通量/mg·m ⁻² ·h ⁻¹	CH ₄ 累积排放量/kg·hm ⁻²	平均排放通量/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	N ₂ O-N 累积排放量/kg·hm ⁻²
早稻	CK	3.49±0.60 ^c	64.50	26.11±2.19 ^b	0.31
	NPK	2.72±0.26 ^c	50.27	208.22±54.07 ^a	2.45
	RS+NPK1	8.25±1.17 ^{ab}	152.46	80.24±4.81 ^a	0.94
	MR+NPK1	4.48±0.63 ^b	82.79	126.34±28.92 ^a	1.48
	CD+NPK2	8.51±1.78 ^a	157.3	56.21±12.54 ^{ab}	0.66
	BD+NPK2	4.06±0.55 ^c	75.03	91.98±11.10 ^a	1.08
晚稻	CK	2.87±0.10 ^c	79.95	7.32±7.71 ^c	0.13
	NPK	5.08±0.93 ^c	141.39	37.83±2.50 ^b	0.67
	RS+NPK1	11.08±0.85 ^b	307.21	28.04±8.15 ^b	0.50
	MR+NPK1	3.51±0.76 ^c	97.78	35.86±6.20 ^b	0.64
	CD+NPK2	18.23±2.82 ^a	507.52	29.73±6.56 ^b	0.53
	BD+NPK2	7.12±0.72 ^{bc}	198.11	83.36±21.29 ^a	1.48
休闲期	CK	0.01±0.02 ^a	0.64	3.98±1.14 ^b	0.12
	NPK	0.09±0.07 ^a	4.00	12.12±2.87 ^a	0.36
	RS+NPK1	0.05±0.02 ^a	2.13	2.79±1.15 ^b	0.08
	MR+NPK1	0.18±0.06 ^a	8.32	10.02±3.52 ^a	0.29
	CD+NPK2	0.17±0.18 ^a	7.78	5.07±1.65 ^{ab}	0.15
	BD+NPK2	0.04±0.002 ^a	1.78	5.20±2.29 ^{ab}	0.15
全年	CK	1.46±0.17 ^c	145.09	9.58±2.96 ^c	0.55
	NPK	1.98±0.32 ^c	195.66	60.82±7.79 ^a	3.48
	RS+NPK1	4.49±0.47 ^b	461.80	25.67±3.63 ^b	1.52
	MR+NPK1	1.92±0.35 ^c	188.89	41.47±9.67 ^{ab}	2.41
	CD+NPK2	6.34±1.16 ^a	672.60	22.11±5.20 ^b	1.34
	BD+NPK2	2.62±0.30 ^c	274.92	42.89±8.79 ^{ab}	2.71

注: (1) 排放通量值均为平均值±标准误差 (SE); (2) 上标字母 a-c 表示同一指标在不同施肥处理之间 LSD 检验显著性差异分组 ($\alpha=0.05$)。

月内部分观测数据缺失, 漏测了该时期 N₂O 排放。

与以往的观测结果不同 (Zheng, et al., 2000; Nishimura, et al., 2004), 本试验稻田 N₂O 排放主要集中在水稻生长期。对照、施化肥处理、稻草处理、菌渣处理、牛粪处理和沼渣处理的早、晚稻生长期 N₂O 累计排放量分别占全年排放总量的 78%、90%、95%、88%、89% 和 94%, 休闲期内排放仅占很小部分, 该结果和西南地区冬水田的 N₂O 排放观测相似 (江长胜等, 2006)。施化肥处理在早稻生长期大量排放 N₂O 而导致全年 N₂O 累计排放量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。在有机无机配施处理中, 菌渣处理的 N₂O 全年累积排放量比稻草处理高 59%, 沼渣处理的 N₂O 全年累积排放量比牛粪处理高 102%。减少稻田 CH₄ 排放

的菌渣和沼渣比新鲜的稻草和牛粪排放更多的 N₂O。

3.3 驱动双季稻 CH₄ 和 N₂O 排放的环境因素

图 3a 和 3b 所示, 早、晚稻移栽前后田间保持淹水状态。早稻在移栽 11 天时由于管理不善田间意外失水, 此时 0~10 cm 土壤湿度 θ_w 大于 90%, 土壤 5 cm Eh 略有上升但仍处于还原状态。早稻和晚稻分别在移栽 42 天和 29 天后采取排水晒田措施, 引起土壤湿度 θ_w 急剧下降, Eh 迅速上升。水稻生长后期均采取干湿交替灌溉方式。休闲期大多数时间内田间处于无水状态。相关性分析表明, 各处理的田间水层变化与土壤 Eh 变化呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与土壤湿度 θ_w 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 而土壤 Eh 与土壤湿度 θ_w 亦呈极显著负相

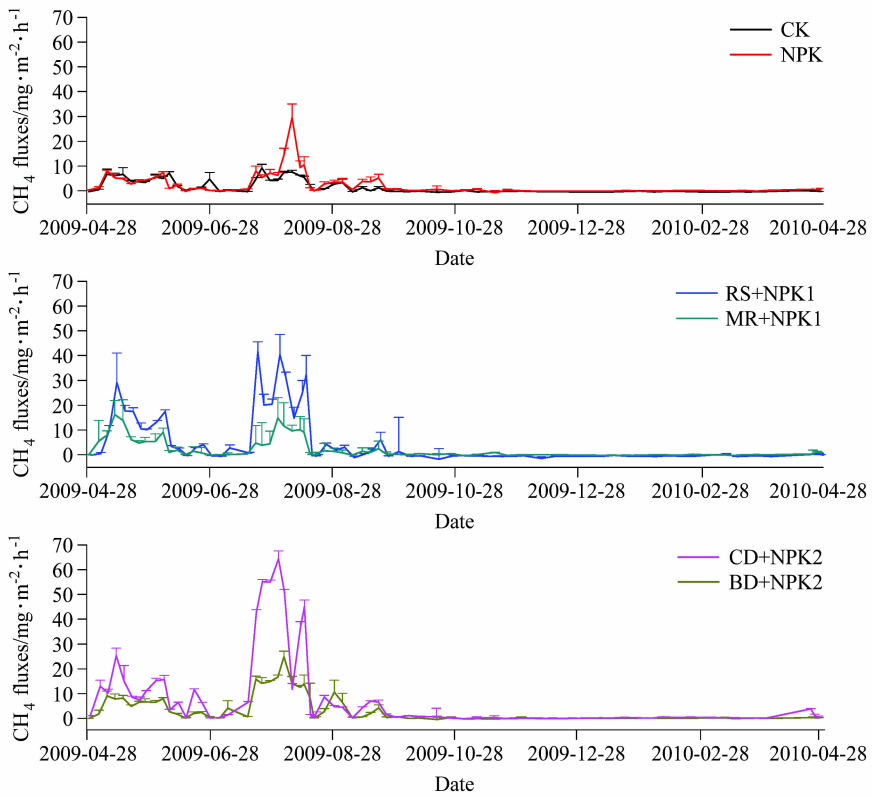


图1 双季稻田 CH₄ 排放通量的季节变化 (平均值+标准误差)

Fig. 1 Seasonal variation of CH₄ emission fluxes in double rice fields (means + standard errors)

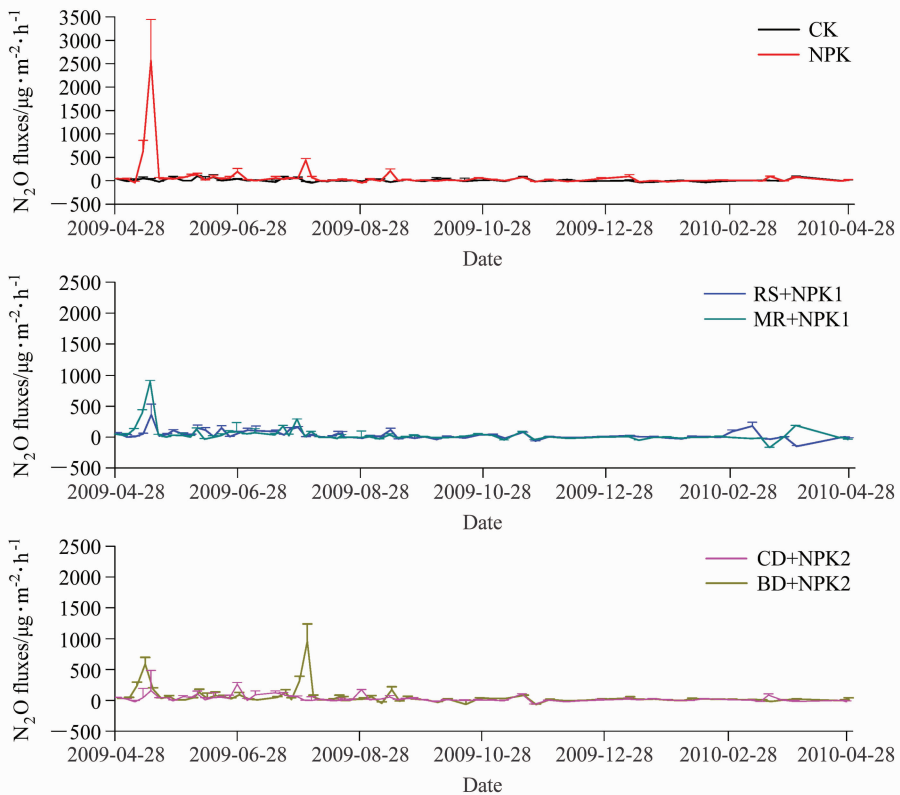


图2 双季稻田 N₂O 排放通量的季节变化 (平均值+标准误差)

Fig. 2 Seasonal variation of N₂O emission fluxes in double rice fields (means+standard errors)

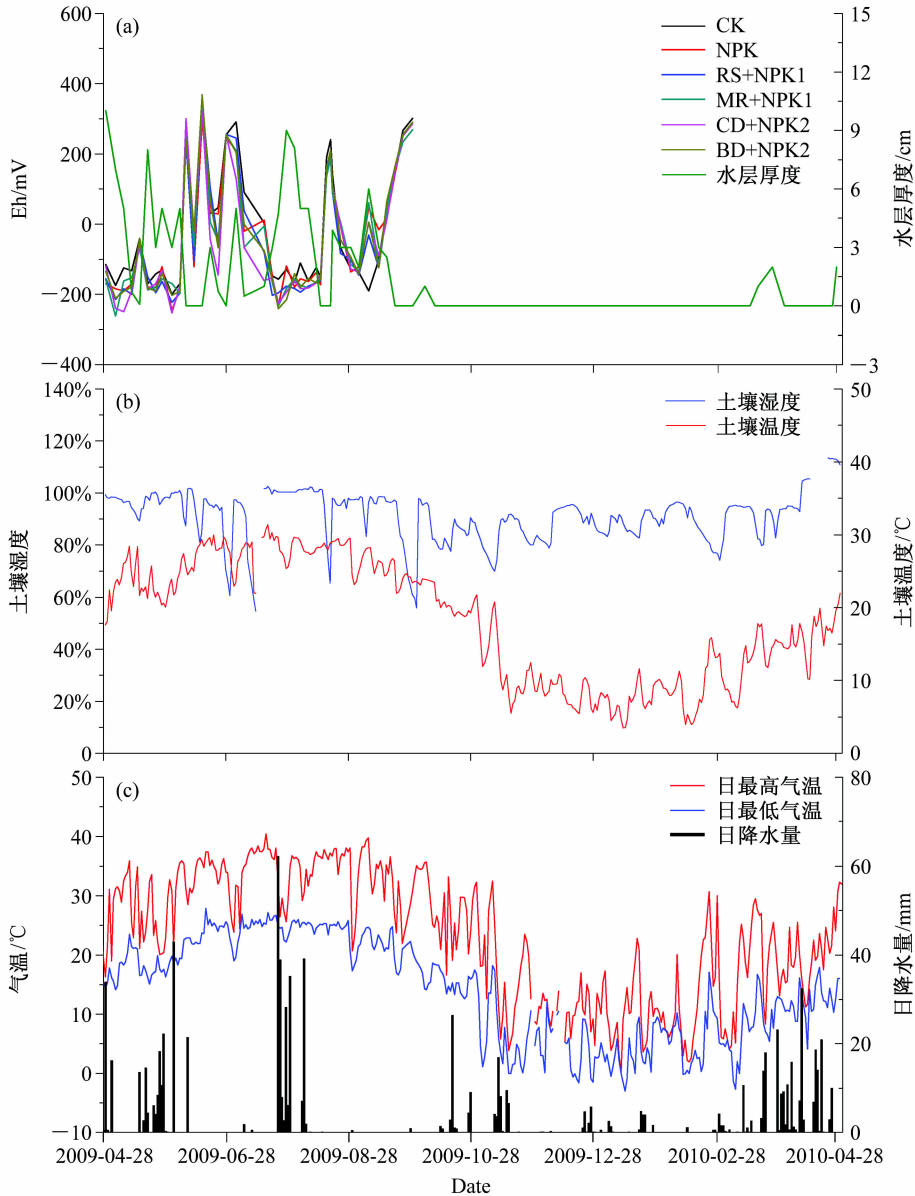


图3 影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的驱动因素: (a) 早、晚稻生长季节内早、晚稻田氧化还原电位 (Eh) 与田间水层厚度的季节变化; (b) 5 cm 土壤温度 (T_s) 和 0 ~ 10 cm 土壤湿度 (θ_w) 动态变化; (c) 日最高/最低气温与日降水量的年变化

Fig. 3 Main driving factors which affected CH_4 and N_2O emissions: (a) Seasonal variation of redox potential (Eh) and water layer thickness in early and late rice fields; (b) dynamic change of soil temperature (T_s) at 5-cm depth and 0-10 cm soil moisture (θ_w); (c) annual change of daily maximum temperature, daily minimum temperature, and daily precipitation

关 ($P < 0.01$)。

整个观测期内气温和降水数据表明 (图 3c), 全年气温介于 -3°C (1 月) ~ 40.4°C (7 月) 之间, 早稻、晚稻和休闲期内土壤 5 cm 平均温度分别为 24.8°C 、 27.1°C 和 11.7°C , 3 ~ 6 月内降水占全年降水的 56%。气温变化与土壤 5 cm 温度的变化高度相关 ($r = 0.91$, $P < 0.01$)。

CH_4 排放通量与相关环境因素多元回归分析发

现, 在淹水条件下 CH_4 排放通量与土壤 5 cm 温度、土壤 Eh 之间存在指数乘积形式的函数关系 [方程 (5)], 而田间无水条件下 CH_4 排放通量受到土壤 5 cm 温度和土壤湿度的综合影响 [方程 (6)]。以上分析表明, 无论田间淹水与否土壤温度均具有正效应, 差别仅在于有无水层覆盖下 CH_4 排放通量对土壤 Eh 和土壤湿度响应的敏感程度, 而土壤湿度在一定程度上决定了土壤 Eh 变化。由此可见, 水、

热变化是驱动稻田 CH₄ 排放季节变化的主要因素。

$$F_{\text{CH}_4} = 0.41e^{(-0.008\text{Eh}+0.064T_s)} - 0.55, \\ n = 199, R^2 = 0.32, \quad (5)$$

$$F_{\text{CH}_4} = 0.11e^{(0.047T_s+0.221\theta_w)} - 1.31, \\ n = 221, R^2 = 0.29, \quad (6)$$

其中, n 为样本个数, R^2 为决定系数。

N₂O 排放分析表明, 全年内田间落干条件下 N₂O 排放通量与气温存在指数函数的关系 [方程 (7)], 水稻生长期田间落干条件下 N₂O 排放通量与土壤 Eh 亦存在指数函数的关系 [方程 (8)], 但全年内和水稻生长期淹水条件下 N₂O 排放通量与相关环境因素之间并不存在显著函数关系。这可能是由于本试验中 N₂O 排放通量对水分变化不敏感, 如晒田期无 N₂O 排放, 因此很难用简单的函数关系来描述整个观测期内复杂的排放过程。

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = 7.22e^{0.0837T_a} - 26.47, \\ n = 211, R^2 = 0.15, \quad (7)$$

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = 32.04e^{0.0027\text{Eh}} - 27.43 \\ n = 55, R^2 = 0.11. \quad (8)$$

3.4 不同有机物料产生 CH₄ 和 N₂O 的能力

由于不同处理的总碳和总氮投入量不相等, 我们用 Q 和 E 值来衡量不同有机物料产生 CH₄ 和 N₂O 的能力, 具体结果见表 5。不同有机物料的 Q 值存在显著性差异。牛粪处理的 Q 值高达 8.52%, 显著大于其他处理 ($P < 0.05$)。稻草处理的 Q 值为 4.48%, 也显著大于菌渣处理 -0.33% 和沼渣处理 1.01% ($P < 0.05$)。早、晚稻田中新鲜牛粪产生 CH₄ 的能力最强, 这是由于牛粪是稻草经过牛消化系统的生物分解后的产物, 颗粒较细, 活性有机碳如挥发性脂肪酸丰富, 在厌氧条件下很快被产甲烷

菌利用产生大量的 CH₄。稻草中糖类和半纤维素等易分解的有机碳在淹水条件下易于被微生物降解产生 CH₄, 而且 C/N 比较宽, 在添加无机氮肥后易于矿化。菌渣和沼渣是稻草再次利用后的形式, 经过长时间的腐熟作用, 有机物中易分解的有机碳含量低, 剩余难分解的有机组分如木质素等很难被微生物降解。因此有机物料转化 CH₄ 的能力与自身腐熟程度关系更为密切。

不同形式的有机物料对稻田 N₂O 排放存在重要影响。化肥处理的 E 值为 0.85%, 显著高于稻草处理和牛粪处理 ($P < 0.05$)。菌渣处理和沼渣处理的 E 值分别为 0.45% 和 0.47%, 比单施化肥处理降低了 47% 和 45%, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。与化肥处理相比, 有机无机配施可以使稻田氮肥 E 值降低 45% ~ 80%。两组配施处理中有有机物料产生 N₂O 能力与产生 CH₄ 能力截然相反。菌渣处理的 E 值比对应稻草处理高 88%, 沼渣处理的 E 值比牛粪处理高 176%, 但差异均不显著 ($P < 0.05$)。

3.5 产量和 CH₄、N₂O 的整体温室效应

除不施肥处理外, 有机无机配施和施化肥处理的早、晚稻均达到了高产, 处理间差异不显著 ($P > 0.05$) (表 6)。以 100 年为时间尺度, 单位质量的 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势 (GWP) 分别为 CO₂ 的 25 倍和 298 倍 (IPCC, 2007)。不同处理 CH₄ 和 N₂O 的整体温室效应 (Integrated global warming potential of CH₄ and N₂O, 总 GWP, 以 CO₂ 计) 存在很大的差异。对照的总 GWP 最小, 仅为 3.89 t/hm², 其他处理的总 GWP 均高于对照。与施等量化肥配施条件下, 稻草处理的总

表 5 不同施肥处理 CH₄ 和 N₂O 产生能力的比较

Table 5 Comparison of CH₄ and N₂O generation abilities of different fertilization treatments

处理	CH ₄			N ₂ O		
	总碳投入量/kg·hm ⁻²	CH ₄ -C/kg·hm ⁻²	Q	总氮投入量/kg·hm ⁻²	N ₂ O-N/kg·hm ⁻²	E
CK		109		0	0.55	
NPK		147		345	3.48	0.85% ^a
RS+NPK1	4442	346	4.48% ^b	401	1.52	0.24% ^b
MR+NPK1	1496	142	-0.33% ^c	409	2.41	0.45% ^{ab}
CD+NPK2	4189	504	8.52% ^a	452	1.34	0.17% ^b
BD+NPK2	5832	206	1.01% ^c	461	2.71	0.47% ^{ab}

注: a-c 表示同一指标在不同施肥处理之间 LSD 检验显著性差异分组 ($\alpha = 0.05$)。

表 6 不同施肥处理下双季稻田产量和 CH₄、N₂O 的整体温室效应Table 6 Yield and integrated GWP of CH₄ and N₂O emissions under organic and inorganic fertilization treatments

处理	稻谷产量		CH ₄ 排放		N ₂ O 排放		总 GWP/ t · hm ⁻²	单位产量的 GWP/kg · kg ⁻¹
	早稻/ kg · hm ⁻²	晚稻/ kg · hm ⁻²	等效 CO ₂ 质量/ kg · hm ⁻²	贡献	等效 CO ₂ 质量/ kg · hm ⁻²	贡献		
CK	3333 ^b	3875 ^b	3627	93%	259	7%	3.89	0.54
NPK	7083 ^a	7641 ^a	4892	75%	1630	25%	6.52	0.44
RS+NPK1	7058 ^a	7650 ^a	11545	94%	712	6%	12.26	0.83
MR+NPK1	6966 ^a	7567 ^a	4722	81%	1129	19%	5.85	0.40
CD+NPK2	6850 ^a	7767 ^a	16815	96%	629	4%	17.44	1.19
BD+NPK2	6925 ^a	8033 ^a	6873	84%	1269	16%	8.14	0.54

注: (1) a、b 表示稻谷产量在不同施肥处理之间 LSD 检验显著性差异分组 ($\alpha=0.05$); (2) 单位产量的 GWP 是指某一处理全年的总 GWP (单位: kg · hm⁻²) 与稻谷产量 (单位: kg · hm⁻²) 的比值。

GWP 为菌渣处理的 2.1 倍, 牛粪处理的总 GWP 亦是沼渣处理的 2.1 倍。与不施肥相比, 施化肥和有机无机配施均增加稻田生产过程中温室气体的排放, 但改变有机物料的形式能有效降低稻田温室效应, 如菌渣处理的总 GWP 低于施化肥处理。

两种温室气体对稻田整体温室效应的贡献是不同的。所有处理中 CH₄ 产生的温室效应占二者总 GWP 的 75% 以上, 是稻田主要的温室气体。在单施化肥处理中, N₂O 对二者总 GWP 的贡献为 25%, 高于有机无机配施处理。单位产量的 GWP (即每千克稻谷产出造成稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的等效 CO₂ 质量) 是衡量不同施肥措施的经济效益和环境效益的一项指标 (Zou et al., 2005)。菌渣处理的单位产量的 GWP 仅为 0.4 kg/kg, 仅为等量化肥条件下稻草处理的 48%, 也低于不施肥和施化肥处理。牛粪处理的单位产量的 GWP 最高, 是沼渣处理的 2.2 倍。与稻草和牛粪与化肥配施相比, 菌渣和沼渣与化肥配施均使稻田 CH₄ 排放降低 59%, CH₄ 和 N₂O 的整体温室效应分别降低 52% 和 53%。采用腐熟的菌渣和沼渣形式的有机物料与化肥配施能够大幅度降低稻谷生产中的温室气体排放, 同时代替部分化肥投入而且保持高产。

4 讨论

4.1 CH₄ 和 N₂O 排放的关系

所有处理的 CH₄ 和 N₂O 在排放时间上均无消长关系。双季稻生长期中菌渣处理和不施肥处理的 CH₄ 和 N₂O 排放通量存在正相关关系, 相关系数分别为 0.33 ($P<0.01$) 和 0.45 ($P<0.01$)。该结

果不同于以往的观测结论 (Cai et al., 1997; 郑循华等, 1997; Zou et al., 2004)。对于稻田 CH₄ 和 N₂O 排放并存的现象, 我们认为有以下两方面原因。

(1) 产生部位不一致。CH₄ 一般产生于土壤耕作的还原层 (2~20 cm) (上官行健等, 1994), 而 N₂O 的产生层次尚未有确定结论 (黄树辉等, 2004)。当田间无水覆盖时, 表层土壤 (0~2 cm) 已经达到了 N₂O 产生的最佳条件, 而 2 cm 以下仍处于还原状态, CH₄ 产生能力并未受到抑制。水稻生长初期表层土壤速效氮含量丰富, 在田间落干的条件下, 表层土壤硝化和反硝化作用剧烈从而大量排放 N₂O, 而土壤深层仍处于饱和水分状态下的还原状态。水层减少有利于 CH₄ 向大气排放。周再兴等 (2007) 观测到稻田在晒田初期 CH₄ 和 N₂O 同步大量排放的现象。

(2) 排放途径不冲突。CH₄ 和 N₂O 都可以通过水稻植株导管运输向大气排放 (李晶等, 1998; Yan et al., 2000)。目前稻田 N₂O 观测数据倾向于淹水条件下排放很低而晒田期间集中排放 (郑循华等, 1997; 邹建文等, 2003)。本试验牛粪和沼渣的投入量高达 22.5 t/hm², 田间水体中丰富的活性有机碳为微生物活动提供了良好的生存环境。水层表面微生物产生的 N₂O 可通过水面直接向大气扩散, 而水层下土壤中产生的 CH₄ 则通过水稻根系吸收由气孔排放。追施氮肥后 NH₄⁺-N 会在水面通过硝化作用转化为 NO₃⁻-N, 而 NO₃⁻-N 进入土壤底层的厌氧环境后以反硝化作用产生的 N₂O, 亦可以通过植株导管的形式向大气排放 (Xing et al., 2009)。

4.2 环境因素对双季稻 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

双季稻田 CH₄ 排放表现出“早稻少, 晚稻多, 休闲期弱”的季节变化特点, 与水、热的变化有密切联系。早稻生长期内出现连续强降水, 气温低, 晒田不彻底, 故晒田期内 CH₄ 排放缓缓下降, 排放持续时间长。晚稻晒田期内气温高而无降水, 0~10 cm 土壤湿度降至 60%, 晒田充分, 导致 CH₄ 排放迅速降低。休闲期内的大多数时间内田间处于无水状态, 而且土壤 5 cm 平均温度仅为 11.7 °C, 土壤产生 CH₄ 的能力十分微弱。水稻生长前期过深的水层对 CH₄ 排放具有一定的阻碍作用。排水晒田初期水层变薄有利于 CH₄ 向大气排放。CH₄ 排放通量取决于土壤温度、Eh 或土壤湿度的综合影响, 土壤温度始终具有正效应, 淹水条件下土壤 Eh 表现为负效应, 落干条件下土壤湿度表现为正效应。土壤 Eh 的大小受土壤通气性强弱的控制, 而土壤通气性又主要取决于土壤水分含量 (Yu et al., 2006)。相关性分析也发现各处理的土壤 Eh 和土壤湿度具有极显著的负相关性。采用土壤水、热因子相结合的方法能够拟合稻田 CH₄ 排放的季节动态变化。

双季稻田 N₂O 排放主要发生在水稻生长期内, 休闲期较少。全年内 N₂O 排放通量和气温、Eh 等环境因素均不存在显著的相关性和函数关系。温度和 Eh 对 N₂O 排放通量的作用只有在田间落干时才能表现出来。早、晚稻晒田期无 N₂O 排放峰可能与施肥方式和晒田时间有关。本试验水稻的氮肥投入总量最多为 233 kg/hm², 远低于以往观测试验的施氮量 (徐华等, 2000; 邹建文等, 2003; 刘惠等, 2006a), 而且早、晚稻田在追肥后 30 天和 21 天才开始排水晒田, 间隔时间大于其他同类试验 (郑循华等, 1997; 邹建文等, 2003; 刘惠等, 2006b)。稻田土壤矿质氮 (NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N) 含量在施肥后 10 天内由于水稻吸收、氨挥发、径流流失而迅速降低 (Nishimura et al., 2004; 李冬初等, 2009)。如果土壤矿质氮浓度很低, 则不具备 N₂O 大量排放的条件 (Bremner, 1997; Nishimura et al., 2005)。一些观测表明, 稻田排水晒田期 N₂O 排放微弱或无排放 (Yagi et al., 1996)。有研究认为田间观测条件下土壤矿质氮、pH 等化学参数对 N₂O 排放的作用大于水分、温度等物理参数 (Lee et al., 2006)。水、热等环境因素对全年内

N₂O 排放的影响, 只有在土壤氮素充足的条件下才能表现出来。

与以往研究结果不同, 本研究未发现水分变化是驱动稻田 N₂O 排放的主要因素。我们认为当土壤物理参数 (水分、温度、土壤通气性等) 达到硝化一反硝化作用条件时, 并不排放 N₂O, 只有在化学参数 (速效氮含量、pH 等) 符合要求时, 一旦达到 N₂O 产生的物理参数边界时立即启动排放过程。

4.3 有机物料对 N₂O 排放的影响

施用有机添加物会增加 C 源而增加稻田 CH₄ 排放, 该结果与其他研究者结果一致 (Yagi et al., 1996; 邹建文等, 2003), 但不同有机物料对 N₂O 排放的影响则较为复杂。本试验结果表明不同有机添加物均会减少稻田氮肥 N₂O 排放, 尤其是稻草和牛粪。有机碳通过吸收或释放有效氮、为反硝化细菌提供能量和创造厌氧环境等主要途径影响土壤 N₂O 排放 (Farquharson and Baldock, 2008; Yao et al., 2010)。一方面, 有机碳进入土壤后固定或释放有效氮。有机物的 C/N 比是决定对有效氮吸收或释放的重要因素 (Huang et al., 2004)。C/N 比大的稻草还田后吸收土壤中的速效氮, 尤其降低水稻生长初期和中期的土壤矿质氮含量 (孟琳等, 2009), 从而降低 N₂O 排放。相比之下, 菌渣的 C/N 比小, 易于矿化分解释放有效氮。其次, 作为产生 N₂O 的反硝化过程是在异养微生物参与下的酶促反应, 增加有机碳为反硝化细菌提供能量, 促使 N₂O 进一步还原为 N₂ (Azam et al., 2002)。牛粪和沼渣的 C/N 比相对接近, 但二者的 E 存在较大差异, 主要原因是牛粪中具有较多的活性碳, 促进土壤厌氧环境的形成, 有利于 N₂O 还原为 N₂ 从而减少 N₂O 排放。

试验采用的四种有机物料可能在氮素形态上存在较大的差异。新鲜的稻草和牛粪的氮主要以有机态形式存在, 而沼渣和菌渣在腐解过程中会产生一定数量的 NO₃⁻-N。NO₃⁻-N 是土壤水分相对充足条件下反硝化作用产生 N₂O 的重要基质。由此可见, 有机物料对 N₂O 排放的影响取决于 C/N 比、氮素形态和有机碳组成等多种因素, 很难用一种指标来判断有机物料产生 N₂O 能力的强弱。C/N 比对有机肥产生 N₂O 的调节理论适用于 C/N 比相差较大的有机肥种类。对于 C/N 比接近的有机物料而言, 氮素形态、有机碳组成可能起主要

作用。

5 结论

(1) 红壤双季稻田 CH_4 排放主要集中在水稻生长期中插秧至晒田阶段, 休闲期内田间无持续淹水, CH_4 排放微弱; N_2O 排放亦主要发生在水稻生长期中, 休闲期排放较少。

(2) 水、热变化是驱动稻田 CH_4 排放季节变化的主要因素。田间无水条件下温度和土壤 Eh 对 N_2O 排放有一定影响。整个双季稻生长期中 CH_4 和 N_2O 在排放时间上无消长关系。排水晒田有效减少稻田 CH_4 排放而不会增加 N_2O 排放。

(3) 不同有机物料产生 CH_4 和 N_2O 的能力存在较大差异。新鲜的稻草和牛粪的有机碳转化为 CH_4 的比例高, 产生 N_2O 的能力弱。腐熟的菌渣和沼渣则表现相反。与单施化肥相比, 有机无机配施降低稻田氮肥 N_2O 直接排放系数。

(4) CH_4 产生的温室效应占到稻田全年整体温室效应的 75% 以上, 是主要的温室气体。以腐熟的菌渣和沼渣代替新鲜的稻草和牛粪, 不仅可以大幅度降低稻田的整体温室效应, 而且能够代替部分化肥, 保持高产。

致谢 感谢中南大学隆平分院李洪顺及湖南农业大学资源环境学院朱坚、唐羽同学在田间采样过程中的帮助! 感谢南京农业大学邹建文教授和另外一位匿名审稿专家对论文修改的指导!

参考文献 (References)

Azam F, Muller C, Benckiser G, et al. 2002. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide—Role of oxidizable carbon and applied nitrogen [J]. *Biology Fertility of Soils*, 35: 54–61.

Bouman A. F. 1996. Direction emission of nitrous oxide from agricultural soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46: 53–70.

Bremner J M. 1997. Sources of nitrous oxide in soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49: 7–16.

Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management [J]. *Plant and Soil*, 196: 7–14.

Farquharson R, Baldock J. 2008. Concepts in modelling N_2O emissions from land use [J]. *Plant and Soil*, 309: 147–167.

黄树辉, 吕军, 曾光辉. 2004. 水稻土裂缝的生成对 N_2O 释放的影响 [J]. *中国环境科学*, 24 (4): 410–413. Huang Shuhui, Lü

Jun, Zeng Guanghui. 2004. The influences of generation of paddy soil cracks on N_2O emissions [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 24 (4): 410–413.

Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. 2004. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 36: 973–981.

IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme [R/OL]. Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. [2010-07-30]

IPCC. 2007. Climate change: Synthesis report. Contribution of working groups I, II, III and the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R/OL]. IPCC, Geneva, Switzerland. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.html. [2010-07-30]

江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 2006. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 27 (2): 207–213. Jiang Changsheng, Wang Yuesi, Zheng Xunhua, et al. 2006. Effects of tillage cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of Southwest China [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 27 (2): 207–213.

Lee J, Six J, King A P, et al. 2006. Tillage and field scale controls on greenhouse gas emissions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35: 714–725.

刘惠, 赵平, 林永标, 等. 2006a. 华南丘陵区农林复合生态系统早稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量的时间变异 [J]. *生态环境*, 15 (1): 58–64. Liu Hui, Zhao Ping, Lin Yongbiao, et al. 2006a. Fluxes of CH_4 and N_2O from paddy field of agroforestry ecosystem in hilly area of South China in the first crop season [J]. *Ecology and Environment (in Chinese)*, 15 (1): 58–64.

刘惠, 赵平, 林永标, 等. 2006b. 华南丘陵地区农林复合生态系统晚稻田甲烷和氧化亚氮排放 [J]. *热带亚热带植物学报*, 14 (4): 269–27. Liu Hui, Zhao Ping, Lin Yongbiao, et al. 2006b. CH_4 and N_2O emission from paddy field of an agroforestry ecosystem in the hilly area of South China [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany (in Chinese)*, 14 (4): 269–27.

李冬初, 徐明岗, 李菊梅, 等. 2009. 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化 [J]. *植物营养与肥料学报*, 15 (2): 303–310. Li Dongchu, Xu Minggang, Li Jumei, et al. 2009. Dynamics of nitrogen in double-rice paddy soil under application of chemical fertilizer combined with manure [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science (in Chinese)*, 15 (2): 303–310.

李晶, 王明星, 陈德章. 1998. 水稻田甲烷的减排方法研究及评价 [J]. *大气科学*, 22 (3): 354–362. Li Jing, Wang Mingxing, Chen Dezhang. 1998. Studies on mitigation methods of methane emission from rice paddies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (3): 354–362.

- 廖西元, 王志刚, 方福平. 2007. 我国农民种植水稻技术调查 [M]. 北京: 中国农业出版社, 214pp. Liao Xiyuan, Wang Zhigang, Fang Fuping. 2007. Technology Survey of Farmer Rice Planting in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 214pp.
- 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 等. 2005. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究 [J]. 农业环境科学学报, 24 (6): 1199-1202. Ma Xiumei, Zhu Bo, Du Zelin, et al. 2005. CH₄, CO₂, and N₂O emissions from the year-round flooded paddy field at fallow season [J]. Journal of Agro-environment Science (in Chinese), 24 (6): 1199-1202.
- 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 2009. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (2): 532-542. Meng Lin, Zhang Xiaoli, Jiang Xiaofang, et al. 2009. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate [J]. Scientia Agricultura Sinica (in Chinese), 42 (2): 532-542.
- Nishimura S, Sawamoto T, Akiyama H, et al. 2004. Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application [J]. Global Biogeochem. Cycles, 18: 1-10, doi: 10.1029/2003GB002207.
- Nishimura S, Sawamoto T, Akiyama H, et al. 2005. Continuous, automated nitrous oxide measurements from paddy soils converted to upland crops [J]. Soil Science Society of America Journal, 69: 1977-1986.
- 上官行健, 王明星, 沈壬兴. 1994. 温度对稻田 CH₄ 排放日变化及季节变化的影响 [J]. 中国科学院研究生院学报, 11 (2): 214-224. Shanguan Xingjian, Wang Mingxing, Shen Renxing. 1994. Temperature effect on diurnal and seasonal variation of CH₄ emission from rice fields [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 11 (2): 214-224.
- 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 2010. 中国稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及减排整合分析 [J]. 中国农业科学, 43 (14): 2923-2936. Shi Shengwei, Li Yu'e, Liu Yuntong, et al. 2010. CH₄ and N₂O emission from rice field and mitigation options based on field measurements in China: An integration analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica (in Chinese), 43 (14): 2923-2936.
- 王明星, 李晶, 郑循华. 1998. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理 [J]. 大气科学, 22 (4): 600-612. Wang Mingxing, Li Jing, Zheng Xunhua. 1998. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 600-612.
- Xing G X, Zhao X, Xiong Z Q, et al. 2009. Nitrous oxide emission from paddy fields in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 29 (1): 45-50.
- 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪. 2000. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响 [J]. 土壤学报, 37 (4): 499-505. Xu Hua, Xing Guangxi, Cai Zucong. 2000. Effect of soil water regime and soil texture on N₂O emission from rice paddy field [J]. Acta Pedologica Sinica (in Chinese), 37 (4): 499-505.
- Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, et al. 1996. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring [J]. Global Biogeochem. Cycles, 10: 255-267, doi: 10.1029/96GB00517.
- Yan X, Shi S, Du L, et al. 2000. Pathways of N₂O emission from rice paddy soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 32: 437-440.
- 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 2008. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估 [J]. 中国农业科学, 41 (12): 4294-4300. Yuan Weiling, Cao Cougui, Cheng Jianping, et al. 2010. CH₄ and N₂O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field [J]. Scientia Agricultura Sinica (in Chinese), 41 (12): 4294-4300.
- Yao Z S, Zhou Z X, Zheng X H, et al. 2010. Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China [J]. Plant and Soil, 327: 315-330.
- Yu K W, Faulkner S P, Patrick W P. 2006. Redox potential characterization and soil greenhouse gas concentration across a hydrological gradient in a Gulf coast forest [J]. Chemosphere, 62 (6): 905-914.
- 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 2008. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 45 (5): 915-924. Zhang Fusuo, Wang Jiqing, Zhang Weifeng, et al. 2008. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica (in Chinese), 45 (5): 915-924.
- 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 1997. 华东稻田 CH₄ 和 N₂O 排放 [J]. 大气科学, 21 (2): 231-237. Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. 1997. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in southeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (2): 231-237.
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. 2000. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: A case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China [J]. Chemosphere-Global Change Science, 2: 207-224.
- Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. 2004. Re-quantify the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands [J]. Global Biogeochem. Cycles, 18, GB2018, doi: 10.1029/2003GB002167
- Zheng X H, Mei B L, Wang Y H, et al. 2008. Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology [J]. Plant and Soil, 311 (1): 211-234.
- 周再兴, 郑循华, 王明星. 2007. 华东稻麦轮作农田 CH₄、N₂O 和 NO 排放特征 [J]. 气候与环境研究, 12 (6): 752-760. Zhou Zaixing, Zheng Xunhua, Wang Mingxing. 2007. CH₄, N₂O and NO emissions from a rice-wheat rotation cropping field in East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),

- 12 (6): 752–760.
- Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. 2004. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice–wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (5): 691–698.
- Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. 2005. A 3-year fields measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 19: 1–9, doi: 10.1029/2004GB002401.
- Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. 2007. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 8030–8042.
- Zou J W, Huang Y, Qin Y M, et al. 2009. Changes in fertilizer-induced direct N₂O emission from paddy fields during rice-growing season in China between 1950s and 1990s [J]. *Global Change Biology*, 15: 229–242.
- 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 2003. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响 [J]. *环境科学*, 24 (4): 7–21. Zou Jianwen, Huang Yao, Zong Lianggang, et al. 2003. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 24 (4): 7–21.